



Emissões acústicas de aerogeradores: método de medição e estudos de caso

Milhomem, T. A. B.¹

¹ Laboratório de Eletroacústica, Inmetro, Duque de Caxias, RJ, Brasil, tbmilhomem@inmetro.gov.br

Resumo

O Brasil é um dos países que mais investe em energia eólica no mundo e ocupa o sexto lugar no Ranking de Capacidade Instalada do Conselho Global de Energia Eólica. Nesse contexto, este artigo apresenta um estudo do método de medição de emissões acústicas de aerogeradores conforme a norma internacional IEC 61400-11 e apresenta dois estudos de caso que permitem visualizar a aplicação do método na prática. Por meio do método descrito na IEC 61400-11, é possível determinar o nível de potência sonora aparente ponderado em A, o seu espectro e a audibilidade-tonal por intervalos (*bin*) de velocidade do vento à altura do cubo (*hub*) de um aerogerador. No primeiro estudo de caso, a Universidade Federal do Ceará mediu o nível de potência sonora aparente de um aerogerador em Aracati/CE. No segundo estudo de caso, a empresa de consultoria Acustica Austral mediu o nível de potência sonora aparente de aerogeradores de seis parques eólicos no Chile. O procedimento de medição é simples na teoria, mas apresenta alguns desafios na prática, como: medir os níveis de pressão sonora provenientes do aerogerador que se quer caracterizar sem a interferência dos demais aerogeradores do parque eólico e medir o ruído de fundo com o aerogerador parado. Os estudos de caso mostraram que o principal parâmetro para a caracterização acústica de um aerogerador é o nível de potência sonora aparente ponderado em A.

Palavras-chave: aerogerador, nível de potência sonora, medição.

Acoustic emissions from wind turbines: measurement method and case studies

Abstract

Brazil is one of the countries that most invests in wind energy in the world and it is ranked sixth in the World Ranking of Wind Energy Installed Capacity of the Global Wind Energy Council. In this context, this paper presents a study of the measurement method of acoustic emissions from wind turbines according to the international standard IEC 61400-11 and presents two case studies that allow visualize the application of the method in practice. By means of the method described in IEC 61400-11, it is possible to determine the A-weighted apparent sound power level, its spectra and the tonal audibility by wind speed bin at hub height of a wind turbine. In the first case study, the Federal University of Ceará measured the apparent sound power level of a wind turbine in Brazil. In the second case study, the consulting company Acustica Austral measured the apparent sound power level of wind turbines at six wind farms in Chile. The measurement procedure is simple in theory, but it presents some challenges in practice, such as measuring the sound pressure levels from the wind turbine that is to be characterized without the interference of other wind turbines in the wind farm and measuring the background noise with the wind turbine stopped. The case studies showed that the main parameter for a wind turbine acoustic characterization is the A-weighted apparent sound power level.

Keywords: wind turbine, sound power level, measurement.

1. Introdução

Em 1992, no arquipélago de Fernando de Noronha, entrou em operação o primeiro aerogerador (turbina eólica) instalado no Brasil. Durante os dez anos seguintes, a energia eólica pouco cresceu principalmente pelo alto custo da tecnologia. Foi só a partir da crise energética de 2001 que se incentivou o uso de fontes alternativas de energia elétrica sendo que, em 2009, ocorreu o primeiro leilão de comercialização de energia voltado exclusivamente para a fonte eólica. Desde então, a fonte eólica tem demonstrado um crescimento sólido e constante e hoje é a segunda fonte da matriz elétrica brasileira com mais de 10 % de participação. A região nordeste concentra mais de 90 % da capacidade instalada no Brasil e, aproximadamente, 90 % dos parques eólicos. Sendo um dos países que mais investe em energia eólica no mundo, o Brasil já ocupa o sexto lugar no Ranking de Capacidade Instalada do Conselho Global de Energia Eólica (GWEC) [1-3].

Nesse contexto, este artigo apresenta um estudo do método de medição de emissões acústicas de aerogeradores, conforme a norma internacional IEC 61400-11, e apresenta dois estudos de caso que permitem visualizar a aplicação do método na prática.

2. Método de medição

A norma internacional que aborda a medição, análise e apresentação de emissões acústicas de aerogeradores é a IEC 61400-11:2012, *Wind turbines – Part 11: Acoustics noise measurement techniques* com sua alteração de 2018.

Por meio do método descrito nessa norma é possível determinar o nível de potência sonora aparente ponderado em A, o seu espectro e a audibilidade-tonal por intervalos (*bin*) de velocidade do vento à altura do cubo (*hub*) de um aerogerador. O nível de potência sonora aparente ponderado em A é o nível de potência sonora referenciado a 1 pW e ponderado em frequência pela curva A de uma fonte pontual no centro do rotor (de um aerogerador) com a mesma emissão na direção do vento que o aerogerador sendo medido. Ainda, a audibilidade-tonal é a diferença entre a tonalidade e o critério de audibilidade em cada intervalo de velocidade do vento. Os intervalos de velocidade do vento têm larguras de 0,5 m/s e são centrados num valor inteiro ou metade de inteiro [4].

A faixa de velocidade de vento está relacionada com o aerogerador sendo, no mínimo, de 0,8 a 1,3 vezes a velocidade do vento quando o aerogerador está operando com 85 % da sua potência máxima. Isso corresponde a uma faixa de, aproximadamente, 6 a 10 m/s a 10 m de altura [4].

Para minimizar a influência do terreno, das condições atmosféricas e do ruído induzido pelo vento, as medições são realizadas próximas ao aerogerador, a uma distância de referência que é baseada nas dimensões do aerogerador (distância do solo ao centro, ou plano equatorial, do rotor e diâmetro, ou diâmetro equatorial, do rotor) [4]. A Figura 1 ilustra as diferentes distâncias dependendo do tipo de aerogerador.

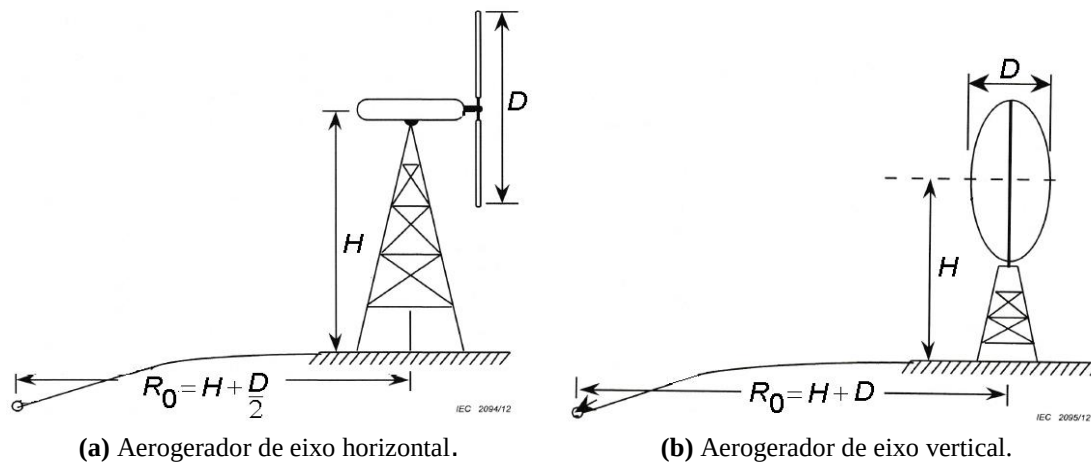


Figura 1: Distância de referência conforme o tipo de aerogerador. R_0 é a distância de referência, H é a distância do solo ao centro (ou plano equatorial) do rotor e D é o diâmetro (ou diâmetro equatorial) do rotor (retirado de IEC [4]).

A posição de referência do microfone fica a sota-vento do aerogerador. Ela deve estar dentro de $\pm 15^\circ$ em relação à direção do vento do aerogerador no momento da medição. Opcionalmente, outras três posições podem ser adotadas. A Figura 2 ilustra as diferentes posições possíveis [4]

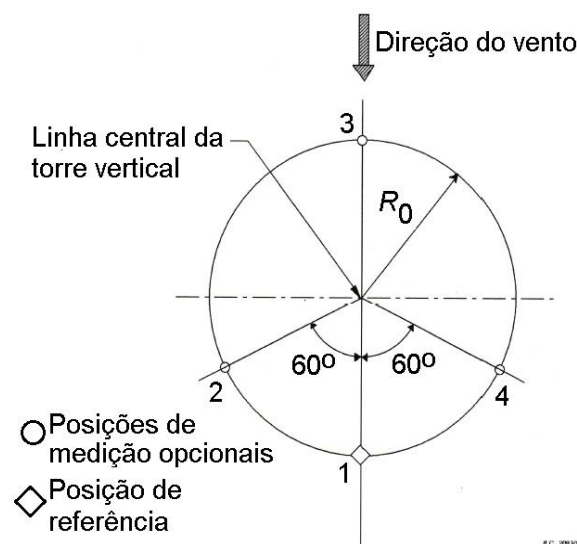


Figura 2: Posições de medição (vista superior) (adaptado de IEC [4]).

O microfone é posicionado no centro de uma placa rígida e plana com o diafragma do microfone perpendicular à superfície da placa. O microfone deve ser usado com um protetor de vento que consiste de uma metade de uma esfera de espuma com diâmetro de, aproximadamente, 90 mm. Um segundo protetor de vento com, ao menos, 450 mm de diâmetro pode ser utilizado para se obter uma relação sinal-ruído adequada em baixas frequências e sob ventos fortes. A placa deve ser circular, com, no mínimo, 1 m de diâmetro, e é colocada sobre o solo para reduzir o ruído do vento gerado no microfone e minimizar a influência dos diferentes tipos de solo. Para minimizar a influência das bordas da placa nos resultados, deve-se garantir que a placa esteja posicionada plana no chão. O ângulo de inclinação da placa deve estar entre 25° e 40° [4]. A Figura 3 ilustra a montagem do microfone.

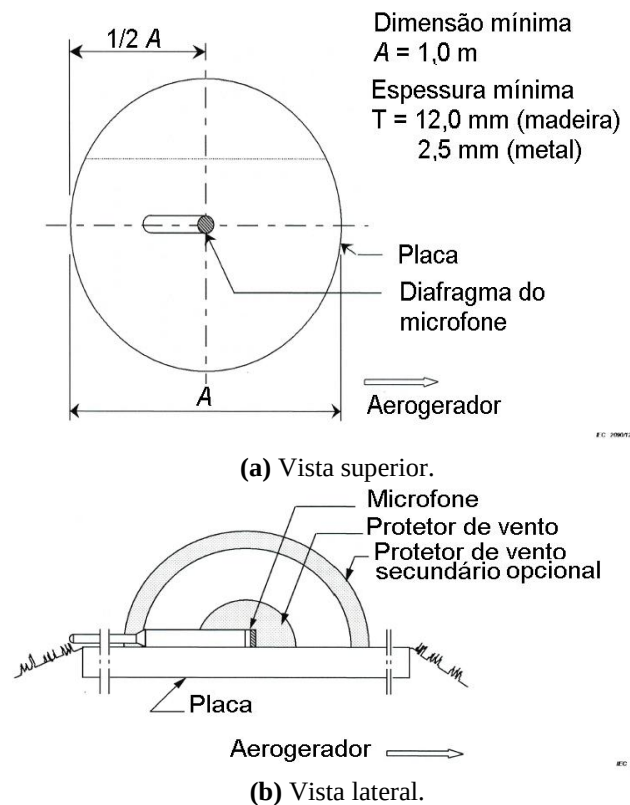


Figura 3: Montagem do microfone (adaptado de IEC [4]).

O equipamento para as medições acústicas deve atender aos requisitos (relevantes para o procedimento de emissões acústicas de aerogeradores) de um sonômetro de Classe 1 conforme à norma internacional IEC 61672 (*Electroacoustics – Sound level meters*) e de um filtro de Classe 1 conforme à norma internacional IEC 61260 (*Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters*). O sistema de medição deve ser ajustado antes, e verificado depois, de cada série de medições utilizando um calibrador de nível sonoro, o qual deve atender aos requisitos de um calibrador de nível sonoro de Classe 1 conforme à norma internacional IEC 60942 (*Electroacoustics - Sound calibrators*). Os equipamentos devem ser calibrados periodicamente e rastreados a um laboratório primário [4].

São medidos níveis de pressão sonora ponderados em A, seus espectros em banda de terço de oitava (na faixa de frequências de 20 Hz a 10 kHz) e em banda estreita, as velocidades do vento para uma faixa de velocidade de vento à altura do cubo (durante o funcionamento do aerogerador) e a 10 m de altura (quando o aerogerador estiver parado para a medição do ruído de fundo). O ruído de fundo deve ser medido imediatamente antes, ou depois, de cada série de medições do ruído do aerogerador, com o aerogerador parado, usando o mesmo sistema de medição e durante condições de vento semelhantes. Então, são calculados os níveis de potência sonora aparente ponderado em A, seus espectros e a audibilidade-tonal [4].

Além desses parâmetros, podem ser medidos infrassom, som impulsivo e modulação de amplitude, mas alguns aspectos desses parâmetros não estão totalmente compreendidos [4].

Existem ainda condições diferenciadas para pequenos aerogeradores com uma potência máxima menor que 100 kW [4].

3. Estudo de casos

Nesta seção serão apresentados dois estudos de caso. O primeiro, uma medição realizada pela Universidade Federal do Ceará de um aerogerador de grande porte no município de Aracati/CE. O

segundo, medições de aerogeradores de seis parques eólicos no Chile realizadas pela empresa de consultoria Acustica Austral.

3.1 Parque eólico na região do Aracati/CE

A Universidade Federal do Ceará mediu o nível de potência sonora aparente de um aerogerador fabricado pela Impsa, de modelo IV-77 e com potência nominal de 1,5 MW. O aerogerador possuía uma torre de 85 m de altura e um rotor de 77 m de diâmetro [5]. A Figura 4 apresenta foto do aerogerador.

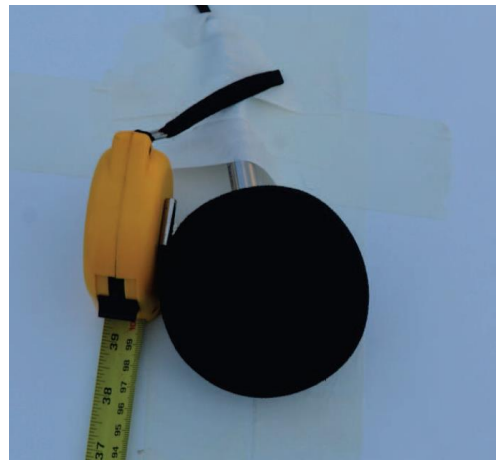


Figura 4: Aerogerador fabricado pela Impsa e de modelo IV-77 localizado em parque eólico na região do Aracati/CE. Registro feito a partir do ponto de medição (retirado de Lima [5]).

O sistema de medição utilizado, fabricado pela BSWA Tech, é composto por um microfone de modelo MPA231, um sistema de aquisição de dados de modelo MC3242, o programa VA-Lab e um calibrador de nível sonoro de modelo CA111. O microfone foi envolto em um protetor de vento com aproximadamente 90 mm de diâmetro e posicionado no centro de uma placa de MDF com 1 m de diâmetro e 15 mm de espessura [5]. A Figura 5 apresenta fotos do sistema de medição.



(a) Sistema de aquisição de dados conectado ao computador.



(b) Microfone envolto em um protetor de vento posicionado na placa de MDF.

Figura 5: Sistema de medição (retirado de Lima [5]).

Após montado o sistema, ele foi ajustado com o calibrador de nível sonoro e o conjunto microfone-placa foi posicionado a uma distância de 60 m da torre do aerogerador. O conjunto foi posicionado de forma a ficar exatamente atrás da torre, na direção do vento. Então, foram realizadas as medições acústicas. Posteriormente, o sistema de medição foi movido e o conjunto microfone-placa foi posicionado à mesma distância de 60 m de um aerogerador de mesmo modelo, no mesmo parque, mas que estava parado. Essa nova posição estava a, aproximadamente, 210 m do aerogerador do qual foram feitas as medições iniciais e a 170 m de um aerogerador em funcionamento. Então, foram realizadas medições acústicas para determinar o ruído de fundo do parque. Os dados, obtidos com o programa VA-Lab, foram tratados utilizando o programa MATLAB e analisados utilizando o aplicativo *Virtual Sound Level Meter*. Os valores de velocidade do vento foram obtidos a partir do anemômetro da nacele do aerogerador [5].

Nessas condições foram medidos os níveis de pressão sonora contínuos e equivalentes ponderados em A de 72,4 dB a 60 m da torre do aerogerador em funcionamento e com uma velocidade do vento de 8,5 m/s; e de 70,9 dB a 60 m da torre do aerogerador parado (medição do ruído de fundo) e com uma velocidade do vento de 10 m/s; o que resulta num nível de potência sonora aparente ponderado em A de 112,4 dB [5].

3.2 Parques eólicos no Chile

A empresa de consultoria Acustica Austral mediu o nível de potência sonora aparente de aerogeradores de seis parques eólicos no Chile. A Figura 6 apresenta foto de três dos aerogeradores medidos [6].



Figura 6: Medição de ruído de aerogerador utilizando o sonômetro fabricado pela Cesva de modelo SC310 em parques eólicos no Chile (retirado de Rodenbeek *et al.* [6]).

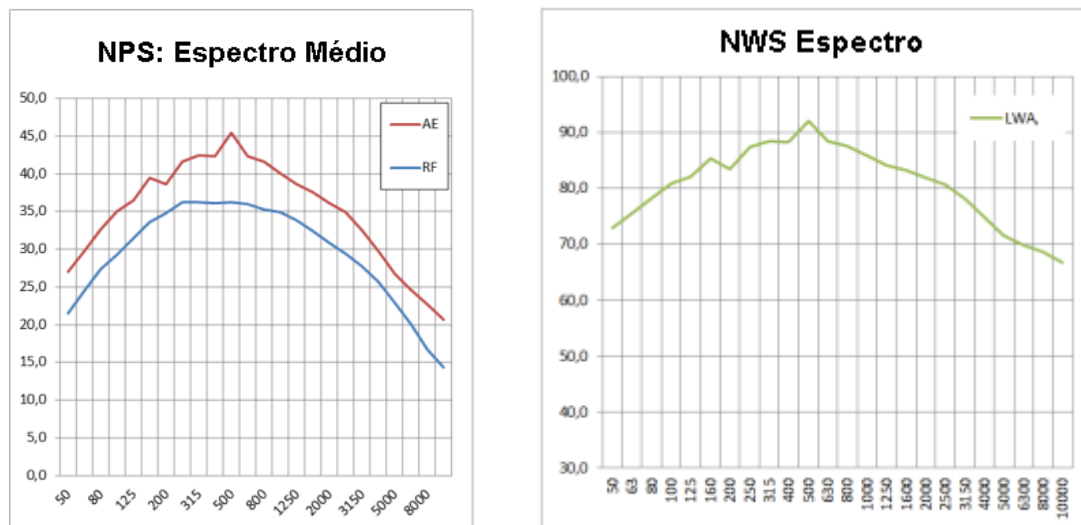
Para as medições foi utilizado um sonômetro fabricado pela Cesva, de modelo SC310 e de Classe 1, com filtro de banda de terço de oitava, e com protetor de vento fabricado pela ACO Pacific e de modelo HEMI18. Foi utilizada também uma placa refletora circular de madeira com 1 m de diâmetro e 15 mm de espessura (ver Figura 6) [6].

Os pontos de medição foram definidos considerando as condições do vento, as características do entorno, a viabilidade (acesso, segurança, tipo de terreno) e as orientações da norma IEC 61400-11. Foram pré-selecionados três aerogeradores em cada parque eólico cuja localização permitiriam medir o ruído do aerogerador com um mínimo de contaminação acústica devido ao ruído de outros aerogeradores próximos. Em alguns casos, se faria necessário parar os aerogeradores mais próximos e foram selecionados pontos que minimizassem o número de aerogeradores a ser parados. A distância do ponto de medição à base da torre do aerogerador seguiu a orientação da norma qual seja que fosse igual a soma da altura da torre com a metade do diâmetro do rotor (ver Figura 1) com uma tolerância de $\pm 20\%$ limitado a ± 30 m. A medição foi realizada a sota-vento com uma tolerância de $\pm 15^\circ$ em relação a direção do vento. O microfone foi posicionado de modo que o ângulo entre uma linha reta que passa pelo microfone em direção ao cubo do aerogerador e a horizontal fosse entre 25° e 40° . Um grande desafio foi encontrar um aerogerador que, à distância recomendada pela norma, não apresentasse contaminação severa pelos aerogeradores ao redor, dado a distância entre os aerogeradores e a não autorização para parar os aerogeradores. Isso fez com que algumas medições não fossem realizadas e com que outras medições, ainda que realizadas, após análise, fossem descartadas. Dos seis parques eólicos investigados, só foram consideradas as medições em dois deles [6].

Todas as medições foram realizadas a sota-vento do aerogerador e com ventos em velocidades que variaram entre 5,5 e 8,5 m/s à altura do cubo. As medições foram realizadas em banda de terço de oitava, com duração mínima de 10 min e com tempo de média de 10 s para cada aerogerador. As informações sobre a velocidade do vento à altura do cubo foram obtidas dos registros das estações meteorológicas de cada aerogerador enquanto que as informações sobre a velocidade do vento à altura de 10 m foram calculadas [6].

A Figura 7 apresenta os gráficos dos níveis de pressão sonora contínuos e equivalentes ponderados em A medidos e o nível de potência sonora aparente ponderado em A calculado para um dos aerogeradores medidos. As medições foram realizadas a 92 m de distância para uma altura do cubo de 90 m. A velocidade do vento, durante a medição com o aerogerador em funcionamento, foi de 8,6 m/s à altura

do cubo (6,1 m/s à altura de 10 m) e, para a medição do ruído de fundo, foi de 8,0 m/s à altura do cubo (5,7 m/s à altura de 10 m). A Tabela 1 apresenta os respectivos valores [6].



(a) Níveis de pressão sonora contínuos e equivalentes ponderados em A para a faixa de frequências de 50 Hz a 10 kHz com uma velocidade do vento à altura de 10 m entre 5,5 e 6,5 m/s, a 92 m de distância da torre do aerogerador, em que “AE” é o nível com o aerogerador em funcionamento e “RF” é o nível de ruído de fundo.

(b) Nível de potência sonora ponderado em A, “LWA”, para a faixa de frequências de 50 Hz a 10 kHz.

Figura 7: Níveis de pressão sonora e o nível de potência sonora aparente para um dos aerogeradores medidos. (adaptado de Rodenbeek *et al.* [6]).

Tabela 1: Níveis de pressão sonora contínuos e equivalentes ponderados em A com uma velocidade do vento à altura de 10 m entre 5,5 e 6,5 m/s, a 92 m de distância da torre do aerogerador, em que “AE” é o nível com o aerogerador em funcionamento e “RF” é o nível de ruído de fundo; e nível de potência sonora aparente ponderado em A, “LWA”, para a faixa de frequências de 50 Hz a 10 kHz (retirado de Rodenbeek *et al.* [6]).

Freq. [Hz]	AE [dB ¹]	RF [dB ¹]	LWA [dB ²]	Freq. [Hz]	AE [dB ¹]	RF [dB ¹]	LWA [dB ²]
50	27,1	21,6	72,8	800	41,6	35,3	87,6
63	29,8	24,5	75,5	1000	40,1	34,9	85,8
80	32,6	27,4	78,3	1250	38,7	33,9	84,1
100	35,0	29,3	80,8	1600	37,6	32,4	83,2
125	36,5	31,5	82,0	2000	36,2	30,9	81,8
160	39,4	33,6	85,3	2500	35,0	29,4	80,7
200	38,6	34,8	83,5	3150	32,6	27,7	78,0
250	41,6	36,3	87,3	4000	29,7	25,7	74,8
315	42,4	36,3	88,4	5000	26,7	22,9	71,6
400	42,3	36,1	88,3	6300	24,6	20,1	69,9
500	45,4	36,2	92,1	8000	22,7	16,8	68,6
630	42,3	36,0	88,3	10000	20,6	14,4	66,6

¹dB ref. 20 μ Pa.

²dB ref. 1 pW.

As medições de ruído não foram realizadas a contento devido à impossibilidade de se parar os parques eólicos. Dos seis parques medidos, apenas um deles autorizou a parada de alguns aerogeradores e isso implicou que a maioria das medições fossem realizadas com outros aerogeradores em funcionamento o que contaminou a medição do aerogerador que se queria caracterizar. Dos resultados obtidos, se pode observar que os maiores níveis de potência sonora se encontram na banda de oitava de 125 Hz a 2 kHz tendo seu valor máximo na banda de oitava de 500 Hz. Adicionalmente, se observou que, para uma mesma banda de frequência, existem variações de até 7 dB em função da velocidade do vento à altura do cubo (para a faixa de 6 a 10 m/s): quanto maior a velocidade do vento, maior o nível [6].

4. Comentários

A medição das emissões acústicas de aerogeradores visa determinar o nível de potência sonora aparente ponderado em A (total e por banda de oitava) e a audibilidade-tonal por intervalos de velocidade de vento.

Para a determinação das emissões acústicas de aerogeradores são medidos os níveis de pressão sonora ponderado em A (total, por banda de oitava e por banda estreita) e as velocidades do vento (à altura do cubo do aerogerador e a 10 m de altura).

A instrumentação necessária consiste de um sonômetro, filtro, calibrador de nível sonoro, placa circular, protetor de vento específico para medições de emissões acústicas de aerogeradores e anemômetro. Para melhorar a relação sinal-ruído, um segundo protetor de vento, também específico, pode ser utilizado. A instrumentação deve ser calibrada periodicamente e rastreada a um laboratório primário.

O procedimento de medição é relativamente simples na teoria, mas apresenta alguns desafios na prática, como: medir os níveis de pressão sonora provenientes do aerogerador que se quer caracterizar, na posição indicada pela norma, sem a interferência dos demais aerogeradores do parque eólico e medir o ruído de fundo com o aerogerador parado. Além desses desafios, há o trabalhoso procedimento para se medir a velocidade do vento a 10 m de altura, assumindo que a velocidade do vento na altura do cubo do aerogerador pode ser obtida por meio do sistema do próprio aerogerador.

5. Conclusão

Foi estudado o método de medição de emissões acústicas de aerogeradores focando: nos parâmetros para a caracterização do aerogerador, nos parâmetros de medição, na instrumentação e no procedimento de medição. Não foram apresentados os cálculos.

Os estudos de caso mostraram que o principal parâmetro para a caracterização é o nível de potência sonora aparente ponderado em A e que há dois grandes desafios na medição: medir os níveis de pressão sonora com o aerogerador que se quer caracterizar em funcionamento e sem a interferência de outros aerogeradores do parque eólico, e medir o ruído de fundo com o aerogerador parado.

6. Propostas de trabalhos futuros

Dando continuidade a esta investigação, as próximas etapas seriam: estudar a legislação e norma vigentes para medir o impacto do ruído proveniente de aerogeradores ou parques eólicos nas áreas habitadas e pesquisar estudos de caso; e estudar a norma vigente para projeção de propagação do som emitidos por aerogeradores e pesquisar estudos de caso.

Em paralelo, buscar parcerias que permitam participar de campanhas de medição ou, ao menos, ter acesso a dados obtidos nessas campanhas para análise conforme a legislação e normas vigentes.

Referências

1. ABEEólica, *O Setor*. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/o-setor/>.
2. ABEEólica, *Boletim Anual 2021*. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>.
3. ABEEólica, Infovento30 (fev./2023). Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>.
4. IEC, IEC 61400-11:2012+AMD1:2018 *Wind turbines Part 11: Acoustic noise measurement techniques*, norma internacional, ed. 3.1, Genebra, Suíça, 2018.
5. LIMA, Samuel A., *Estudo de medição e análise do ruído de aerogeradores de grande porte no estado do Ceará*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE, 2015.
6. RODENBEEK, Juan P. Á. e MONARCA, Nicolás A. B., *Caracterización acústica de parques eólicos – Informe final*. Relatório técnico, Acustica Austral, Chile, 2018.